

Научная статья / Research Article

УДК 621.311.16:662.767.2

**ЗАВИСИМОСТЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ
МЕТАНА В БИОГАЗЕ ПРИ КОГЕНЕРАЦИИ****В.В. Бабков, М. П. Баранова***Красноярский государственный аграрный университет, Россия, 660049,
Красноярск, пр. Мира, 90*

Аннотация. *Статья посвящена исследованию влияния переменного состава биогаза, в частности концентрации метана, на стабильность работы когенерационных установок (КГУ) и показатели качества электроэнергии. В работе проанализированы типичные режимы работы биогазовых установок (БГУ), выявлены критические диапазоны содержания метана, проведена количественная оценка отклонений напряжения и частоты, а также определены основные факторы, ухудшающие качество электроэнергии. Результаты исследования демонстрируют, что колебания состава биогаза являются одной из ключевых причин нестабильности генерации, и для обеспечения нормативных показателей требуется комплексный подход к управлению и стабилизации параметров установки.*

Ключевые слова: *биогаз, когенерация, качество электроэнергии, метан, стабильность частоты, отклонение напряжения.*

**DEPENDENCE OF ELECTRIC POWER QUALITY ON METHANE
CONCENTRATION IN BIOGAS DURING COGENERATION****V.V. Babkov, M.P. Baranova***FSBEI HE Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia*

Annotation. *The article is devoted to the study of the influence of variable biogas composition, particularly methane concentration, on the stability of cogeneration plants (CGU) and electric power quality indicators. The paper analyzes typical operating modes of biogas plants (BGP), identifies critical ranges of methane content, provides a quantitative assessment of voltage and frequency deviations, and determines the main factors that degrade power quality. The research results demonstrate that fluctuations in biogas composition are one of the key causes of generation instability, and ensuring standard indicators requires an integrated approach to managing and stabilizing the plant parameters.*

Key words: *biogas, cogeneration, power quality, methane, frequency stability, voltage deviation.*

Введение. Когенерация на основе биогазовых установок является перспективным направлением в области распределенной энергетики, позволяющим решать задачи утилизации органических отходов и обеспечения энергетической независимости локальных объектов. Однако на пути широкого внедрения этой технологии стоит серьезная проблема – нестабильность качества генерируемой электроэнергии. В отличие от традиционных источников энергии, биогаз имеет переменный компонентный состав, который напрямую зависит от типа сырья, температуры брожения, времени пребывания субстрата в метантенке и других технологических факторов. Это приводит к колебаниям теплотворной способности топлива, что, в свою очередь, вызывает отклонения частоты и напряжения, появление гармонических искажений и снижение общей надежности энергоснабжения [1].

Цель данной работы – на основе экспериментальных и расчетных данных, количественно оценить влияние концентрации метана на ключевые показатели качества электроэнергии в системах с биогазовыми когенерационными установками.

Типичный состав биогаза и его нестабильность. Биогаз представляет собой смесь газов, основными компонентами которой являются метан (CH_4) и диоксид углерода (CO_2). Содержание метана, определяющее энергетический потенциал топлива, колеблется в широких пределах (50–75%) и крайне редко бывает постоянным. Стандартный усредненный компонентный состав биогаза, используемый в расчетах, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Компонентный состав биогаза

Наименование компонента биогаза	Химическая формула компонента	Диапазон объемного содержания, % об.
Метан	CH_4	50–75
Диоксид углерода	CO_2	25–45
Азот	N_2	0–5
Сероводород	H_2S	0,01–0,5
Пары воды	H_2O	2–6

Как показано в работе, динамика изменения содержания метана и углекислого газа напрямую коррелирует с режимом работы установки (рис. 1). При нарушении технологических параметров (например, снижении температуры брожения) доля метана падает, а доля CO_2 растет, что приводит к ухудшению качества топливной смеси.

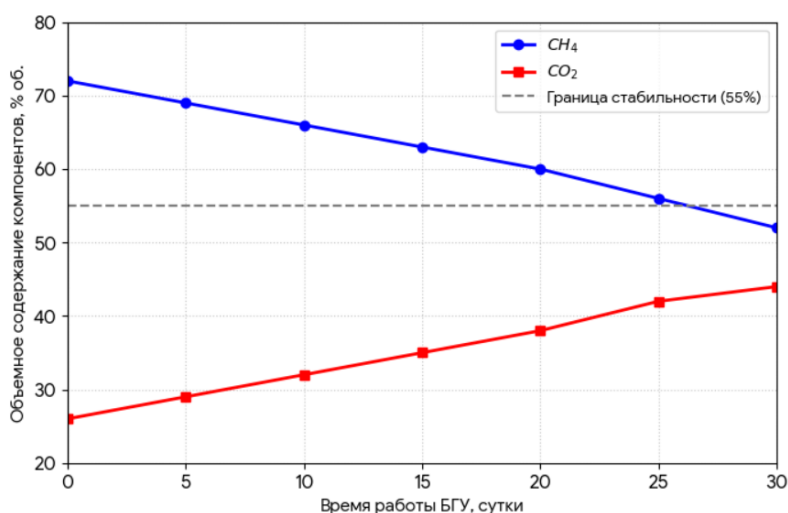


Рисунок 1 – Динамика изменения объемного содержания метана и диоксида углерода

Критерии стабильности работы двигателя. Основным горючим компонентом является метан. Снижение его концентрации оказывает прямое негативное влияние на процесс сгорания в газопоршневом двигателе: уменьшается скорость распространения пламени, падает теплота сгорания, возрастает время задержки воспламенения, что в итоге ведет к нестабильности крутящего момента и частоты вращения вала генератора [2].

В ходе работы был введен специальный коэффициент стабильности работы первичного двигателя ($K_{ст}$), который объединяет теплотворную способность биогаза и фактическую скорость распространения пламени. Значения этого коэффициента для различных составов газа приведены в табл.2.

Таблица 2

Коэффициент стабильности работы первичного двигателя при разном составе биогаза

Объемное содержание CH ₄ , % об.	Объемное содержание CO ₂ , % об.	Низшая теплота сгорания Q _{н,бг} , МДж/м ³	Расчетный коэффициент стабильности K _{ст}	Характер режима работы первичного двигателя
72	26	26,1	0,98	Полностью стабильный номинальный режим
65	34	23,9	0,90	Нормальный стабильный эксплуатационный режим

58	40	21,2	0,81	Частичная нестабильность рабочих циклов
55	45	18,5	0,68	Критический нестабильный режим, эксплуатация запрещена

Как видно из данных таблицы, при снижении концентрации метана с 72% до 55% коэффициент стабильности падает на 30%, а при содержании метана ниже 55% ($K_{ст} < 0,7$) дальнейшая эксплуатация двигателя без корректировки режимов становится невозможной из-за высокого риска повреждения оборудования.

Влияние колебаний состава биогаза на параметры электроэнергии.

Колебания крутящего момента на валу двигателя, вызванные изменением состава газа, непосредственно отражаются на частоте вращения ротора генератора, а следовательно, и на частоте генерируемого тока. Количественные взаимосвязи между содержанием метана и параметрами электроэнергии обобщены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры электроэнергии и состояние оборудования
при различном составе биогаза

Режим работы	Содержание метана, %	Теплота сгорания, МДж/м ³	Частотные отклонения, Гц	Относительные отклонения напряжения, %	Состояние оборудования
Оптимальный	65–70	24,5–25,5	$\pm 0,2-0,5$	2–5	Стабильная работа
Допустимый	55–65	20,0–24,5	$\pm 0,5-1,2$	5–12	Нормальная работа
Критический	50–55	17,0–20,0	$\pm 1,2-1,5$	12–15	Нестабильная работа
Аварийный	<50 или >70	<17,0 или >25,5	$>\pm 1,5$	>15	Риск повреждения

При переходе в критический режим (50–55% метана) отклонения частоты достигают 1,5 Гц, что в три раза превышает норму (ГОСТ 32144-2013 допускает $\pm 0,2$ Гц). Одновременно наблюдается значительный провал напряжения – до 15% от номинала. В случае снижения концентрации метана ниже 50% частота может упасть до 47 Гц, напряжение – на 25%, что

приводит к отключению газоразрядных ламп, отпаданию магнитных пускателей и переходу электронного оборудования в аварийный режим [2-4]. Графики, иллюстрирующие полученные зависимости, представлены на рис. 2 и 3.

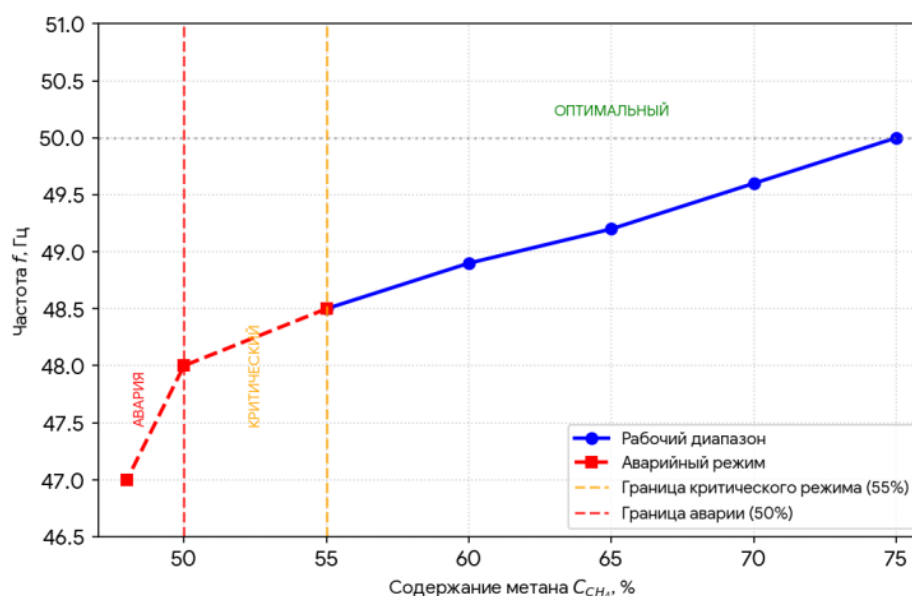


Рисунок 2 – Зависимость частоты f от содержания метана C_{CH_4}

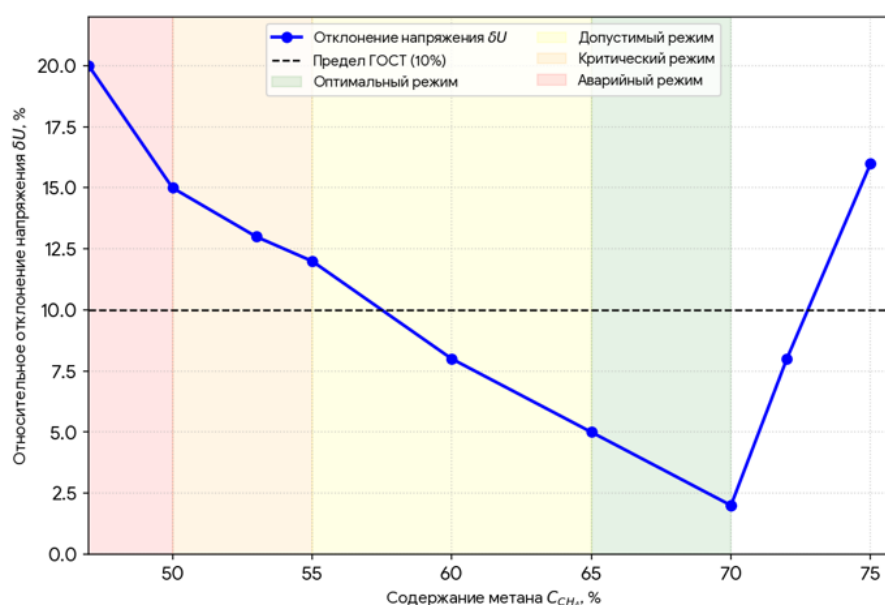


Рисунок 3 – Зависимость относительного отклонения напряжения δU от содержания метана C_{CH_4}

Гармонические искажения. Гармонические искажения напряжения и тока являются одним из наиболее критических нарушений качества электроэнергии при работе биогазовых когенерационных установок. Основным источником гармоник выступают инверторные преобразователи,

использующие ШИМ-модуляцию для преобразования постоянного тока в переменный промышленной частоты. Для инвертора КГ-290-А характерны нечетные гармоники, порядок которых определяется выражением $n = 6k \pm 1$, что дает доминирующие 5-ю (250 Гц), 7-ю (350 Гц), 11-ю (550 Гц) и 13-ю (650 Гц) гармоники [1]. В таблице 3 представлены коэффициенты несинусоидальности для инвертора КГ-290-А.

Таблица 3
Коэффициенты несинусоидальности для инвертора КГ-290-А

Режим нагрузки инвертора	THD _U , %	THD _I , %	Соответствие ГОСТ 32144-2013
100% (номинал)	7,66	14,52	Соответствует ($\leq 8\%$)
50%	11,30	21,49	Не соответствует
30%	15,02	29,05	Не соответствует

При номинальной нагрузке уровень искажений соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013 $THD_U \leq 8\%$. Однако при снижении нагрузки до 50% коэффициент THD_U возрастает до 11,30%, имеет место превышение на 3,3%, а при 30% достигает 15,02%, что является превышением на 7,02%. Это связано с изменением алгоритма ШИМ-модуляции и увеличением дискретности импульсной последовательности [4].

Области стабильной работы. На основе расчетов и экспериментальных данных была построена диаграмма стабильности (рис. 4), которая наглядно показывает безопасные и аварийные режимы эксплуатации КГУ.

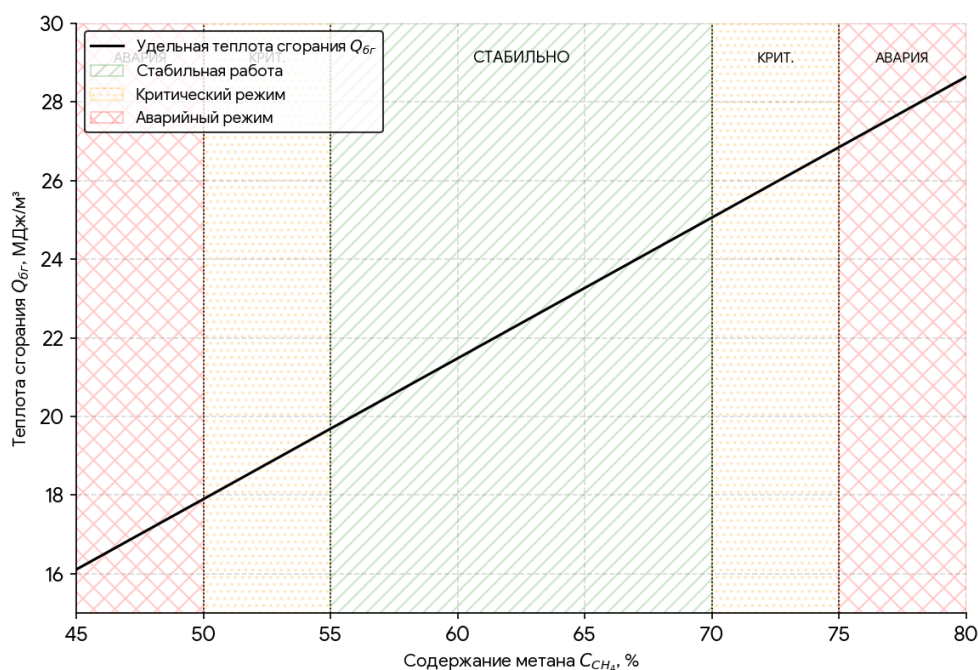


Рисунок 4 – Область стабильной работы когенерационной установки

Зеленая зона, $\text{CH}_4 = 55\text{--}70\%$, соответствует стабильной работе оборудования. Желтая зона, $50\text{--}55\%$ и $70\text{--}75\%$, – критический режим, требующий особого контроля. Красная зона, $<50\%$ или $>75\%$, – аварийный режим, при котором эксплуатация установки должна быть немедленно прекращена.

Заключение.

Проведенный анализ показывает, что вариативность состава биогаза является доминирующим фактором, определяющим стабильность работы когенерационной установки и качество вырабатываемой электроэнергии.

- Содержание метана в биогазе должно поддерживаться в узком диапазоне ($55\text{--}70\%$). Оптимальными являются значения $65\text{--}70\%$, при которых обеспечиваются номинальные параметры электроэнергии.
- Снижение концентрации метана ниже 55% приводит к критическому падению частоты и напряжения, росту гармонических искажений и создает прямую угрозу выхода из строя как самой КГУ, так и подключенного электрооборудования.
- Для обеспечения нормативных требований (ГОСТ 32144-2013, IEEE 519) необходимо внедрение систем активной стабилизации: регулирования возбуждения генератора, буферных накопителей энергии и активных фильтров гармоник
- Без комплексного контроля за составом газа и применением компенсирующих технических решений устойчивая и безопасная эксплуатация биогазовых установок в условиях переменного состава топлива невозможна.

Список литературы

1. Бабков В.В. Повышение качества электроэнергии при когенерации на биогазовых установках/ В.В. Бабков // Магистерская диссертация. – Красноярск: КрасГАУ. - 2026. – 116 с.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ. 2014.
3. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives /P. Weiland// Applied Microbiology and Biotechnology. – 2010. – Vol. 85. – P. 849–860.
4. Gaifullin I.Kh. Improving the operating modes of the biogas plant/I.Kh. Gaifullin, B.G. Ziganshin, D.T. Khaliullin//Bulletin of Kazan State Agrarian University. – 2025. – № 2. - P. 72-78.

References

1. Babkov V.V. Improving the quality of electricity during cogeneration at biogas plants/V.V. Babkov//Master's thesis. - Krasnoyarsk: Krasgau. - 2026. – 116 p.

2. GOST 32144-2013. Electrical energy. Electric power quality standards in general-purpose power supply systems. - Anavar. 2014-07-01. - M.: Standartinform. 2014.
3. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives/ P. Weiland// Applied Microbiology and Biotechnology. – 2010. – Vol. 85. – P. 849–860.
4. Gaifullin I.Kh. Improving the operating modes of the biogas plant/I.Kh. Gaifullin, B.G. Ziganshin, D.T. Khaliullin//Bulletin of Kazan State Agrarian University. – 2025. – № 2. - P. 72-78.

Сведения об авторах.

Бабков Василий Васильевич, магистр, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия,

Член Общества энергетики и экологии провинции Хейлунцзян / Северо-Восточный сельскохозяйственный университет, Харбин, КНР.

Баранова Марина Петровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой системозенергетики ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ»,

Information about the authors

Babkov Vasily Vasilievich, master, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia, Member of the Heilongjiang Energy and Ecology Society/Northeast Agricultural University, Harbin, PRC. vasababkov@gmail.com

Baranova Marina Petrovna, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of System Energy Krasnoyarsk State Agrarian University. marina60@mail.ru